

## **PENGARUH JARAK DAN VARIASI PENEMPATAN MULTI-INKLUSI BERBENTUK LINGKARAN TERHADAP PERILAKU BETON**

Anastasia Yesica, Rakhma Nurfitriani Editia, Rudi Yuniarto Adi <sup>\*)</sup>, Han Ay Lie <sup>\*)</sup>

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof Soedarto, Tembalang, Semarang. 50239, Telp.: (024)7474770, Fax.: (024)7460060

### **ABSTRAK**

*Respon kekuatan dan kekakuan dari material dasar penyusun beton, seperti mortar dan agregat, telah diketahui secara luas. Material agregat memiliki perilaku yang linear dari awal pembebanan hingga runtuh dengan nilai kekuatan dan kekakuan yang sangat tinggi, sedangkan material mortar memiliki perilaku yang non-linear. Perpaduan dari dua material dasar ini menciptakan suatu campuran beton yang justru memiliki nilai kekuatan dan kekakuan yang lebih rendah. Penelitian ini meninjau pengaruh dari jarak dan variasi penempatan multi-inklusi dari benda uji yang berukuran 100x100x50 mm. Penelitian ini memfokuskan terhadap dua buah konfigurasi perletakan inklusi, yaitu sejajar dan diagonal terhadap arah pembebanan dengan jarak antar inklusi yang bervariasi. Hasil menunjukkan bahwa jarak dan variasi penempatan dari inklusi sangat mempengaruhi perilaku dan pola retak dari benda uji. Kuat tekan dari benda uji memiliki titik puncak maksimum dan minimum, sedangkan nilai kekakuan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya volume inklusi pada suatu benda uji. Pengamatan secara visual yang juga dilakukan pada penelitian ini mengungkap bahwa crack awal selalu terjadi pada daerah kontak antara agregat dan mortar yang merupakan daerah bertegangan tarik tinggi dan kemudian crack tersebut menyebar hingga akhirnya benda uji runtuh. Pada benda uji yang memiliki jumlah inklusi tinggi berkonfigurasi diagonal menunjukkan terjadinya deviasi/pembiasan pola retak dari columnar menjadi cenderung diagonal.*

**kata kunci :** jarak dan penempatan inklusi, kuat tekan, nilai kekakuan, pola retak.

### **ABSTRACT**

*The stress-strain response of the basic concrete making material, i.e. the mortar and aggregates, are well known. In general, the aggregate behaves linearly up till failure, possessing a very high ultimate compression strength and stiffness. The behavior of mortar is non-linear, even at low loading levels. The resulting composite material, the concrete, exhibits a less stiff response, in combination with degradation in strength. This study looked into the influence of the centroid distance and configuration of a 100x100x50 mm mortar specimen. Two inclusion configurations were considered, parallel and diagonal to the line of loading with the distance variety. It was shown that the centroid distance and configuration strongly influenced the strength, the stiffness, and failure mode. The strength behavior had a minimum and a maximum bifurcation point, while the stiffness response*

---

<sup>\*)</sup> Penulis Penanggung Jawab

*increased, as a function of an increase in the inclusion-to-specimen volume ratio. Visual observation of the cracking pattern revealed that the initial cracking was always situated at the interface between the aggregate and mortar in tension and propagated through the mortar matrix. It was also perceived that the crack propagation path of the very dense, diagonally arranged inclusions deviated from the columnar configuration observed from the parallel inclusion formation.*

**keywords:** *centroid distance and configuration of inclusions, compressive strength, stiffness, cracks propagation.*

## **PENDAHULUAN**

Perilaku beton sangat dipengaruhi oleh material dasar penyusunnya, yaitu mortar dan agregat. Pencampuran dari kedua material dasar ini menciptakan suatu zona kontak bernama Interfacial Transition Zone (ITZ) yang akan sangat mempengaruhi nilai kuat tekan dan kekakuan dari beton. Material agregat memiliki nilai kuat tekan dan kekakuan yang sangat tinggi dengan perilaku tegangan-regangan yang linear hingga mencapai batas keruntuhannya. Sebaliknya, mortar sebagai matriks dari beton memiliki perilaku tegangan-regangan yang non-linear dengan nilai kuat tekan dan kekakuan yang jauh dibawah dari material agregat. Perbandingan nilai kuat tekan mortar terhadap agregat berkisar 1 : 5, sedangkan perbandingan nilai kekakuan mortar terhadap agregat berkisar 1 : 7. Kesenjangan yang sangat tinggi inilah yang menciptakan konsentrasi tegangan dan regangan yang tinggi pada daerah kontak dari kedua material tersebut hingga akhirnya terjadi *micro-crack* pada ITZ.

Penelitian Han et al. (2014) menunjukkan bahwa bentuk dari agregat sangat mempengaruhi konsentrasi tegangan pada suatu pencampuran beton. Pada benda uji yang menggunakan inklusi dengan sudut tajam/lancip terhadap arah pembebanan akan memberikan efek negatif terhadap nilai kuat tekan yang dihasilkan, sedangkan pada benda uji dengan inklusi berbentuk persegi panjang justru menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih baik.

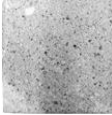
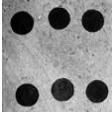
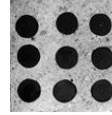
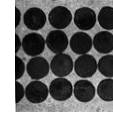
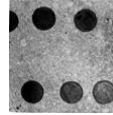
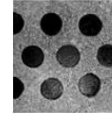
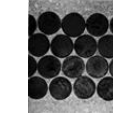
Penelitian Abipramono (1997) meninjau pengaruh jumlah inklusi baja terhadap kuat tekan beton. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jumlah inklusi yang semakin bertambah akan menyebabkan penurunan kuat tekan, namun pada inklusi dengan jumlah lebih dari 6 buah justru menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan. Hal ini terjadi karena adanya peningkatan distribusi transfer tegangan dari mortar ke multi-inklusi baja yang semakin baik. Maka dengan jumlah inklusi yang semakin banyak akan menyebabkan jumlah zona ITZ yang semakin banyak pula, namun disisi lain transfer tegangan dari inklusi juga semakin baik.

Dari penjelasan diatas, maka penelitian ini akan meninjau lebih spesifik terhadap efek dari jarak dan konfigurasi penempatan multi-inklusi berbentuk silinder yang bervariasi terhadap perilaku nilai kuat tekan, nilai kekakuan, dan pola retak dari benda uji berukuran 100x100x50 mm.

## STUDI EKSPERIMENTAL

Konfigurasi dari benda uji dibedakan menjadi dua grup, yaitu posisi inklusi sejajar terhadap arah pembebanan ( $SL_i$ ) dan posisi inklusi diagonal terhadap arah pembebanan ( $SD_i$ ). Huruf  $i$  pada  $SL_i$  dan  $SD_i$  menunjukkan perbedaan variasi terhadap jarak antar inklusi untuk setiap benda uji, dengan *mortar-only* (SO) sebagai rasio pembandingan. Masing-masing jarak antar inklusi dan perbandingan volume inklusi terhadap benda uji dijelaskan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Detail benda uji

Benda Uji	SO	$SL_1$	$SL_2$	$SL_3$	$SD_1$	$SD_2$	$SD_3$
Jarak antar inklusi	-	3D	1,5D	1D	3D	1,5D	1D
$\frac{\text{Volume}_{\text{inklusi}}}{\text{Volume}_{\text{benda uji}}}$	0	0.20	0.30	0.65	0.20	0.30	0.66
Konfigurasi Inklusi							

Setelah proses pengecoran, dilakukan *curing* untuk semua benda uji dengan cara direndam dan dites saat umur 28 hari. Inklusi berasal dari batu alam quarry Kandangan yang telah dilakukan proses *core-drill* hingga bentuk silinder dengan diameter 20,8 mm ( $D = 20,8$  mm) dan tinggi 50 mm. Semen yang digunakan pada penelitian ini menggunakan semen Gresik tipe Ordinary Portland Cement (OPC), dengan agregat halus menggunakan pasir muntitan dengan gradasi ideal sesuai dengan ASTM C33-03. Sebelum proses pembuatan benda uji, dilakukan uji *properties* terlebih dahulu terhadap agregat halus. Hasil uji *properties* dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Hasil uji *properties* material agregat halus

Jenis Pengujian	Hasil
Kadar Air Asli	0,37%
Kadar Air SSD	1,20%
Berat Isi Asli	Gembur : 1509 kg/m <sup>3</sup> Padat : 1658 kg/m <sup>3</sup>
Berat Isi SSD	Gembur : 1548 kg/m <sup>3</sup> Padat : 1692 kg/m <sup>3</sup>
Berat Jenis Asli	2,512
Berat Jenis SSD	2,531

Pengujian benda uji menggunakan *Compression Test Machine* merek Hung Ta. Pengujian benda uji menggunakan teflon pada sisi atas dan bawah agar meratakan beban yang diberikan dan benda uji tidak mengalami gesekan dengan permukaan pelat selama pembebanan dilakukan. Empat buah LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) arah vertikal dipasang pada sisi tepi kanan atas, kanan bawah, kiri atas, dan kiri bawah dari benda uji, berfungsi untuk mengukur *displacement*. Kemudian kabel-kabel dari LVDT dihubungkan ke data *logger* untuk pembacaan data. Pembebanan pada benda uji dilakukan

secara bertahap 0,2 MPa/sec hingga mencapai beban maksimum dimana kondisi benda uji telah mengalami retak.

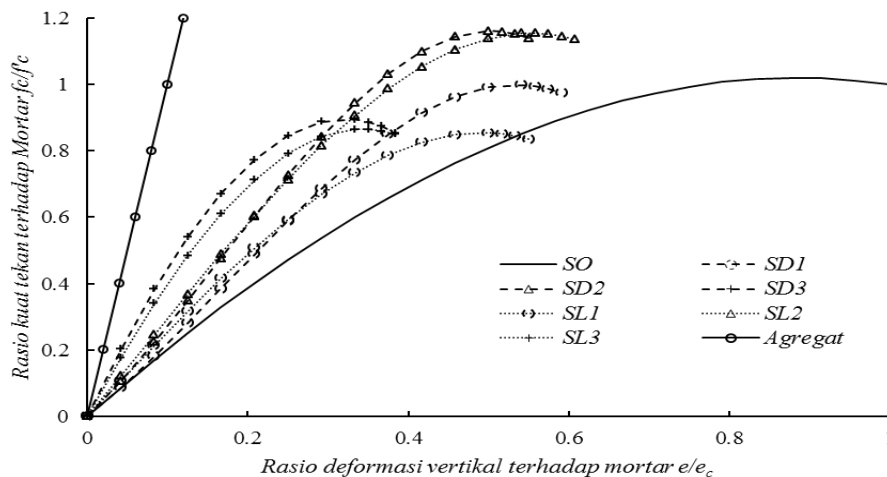
Untuk pengamatan secara visual terhadap pola retak dan pergerakannya, digunakan kamera dengan resolusi tinggi selama pengujian berlangsung untuk merekam proses keruntuhan dan menyelidiki awal terjadinya crack dari masing-masing benda uji.

## HASIL PENGUJIAN

Hasil pengujian dari penelitian ini dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu berupa data kuantitatif dan data kualitatif. Data kuantitatif merupakan data hasil pengujian dari benda uji berupa grafik load-displacement, nilai beban puncak dan nilai kekakuan murni. Data kualitatif berupa hasil observasi secara visual terhadap perbedaan perilaku pola retak untuk benda uji dengan inklusi arah sejajar dan diagonal.

### Data Kuantitatif

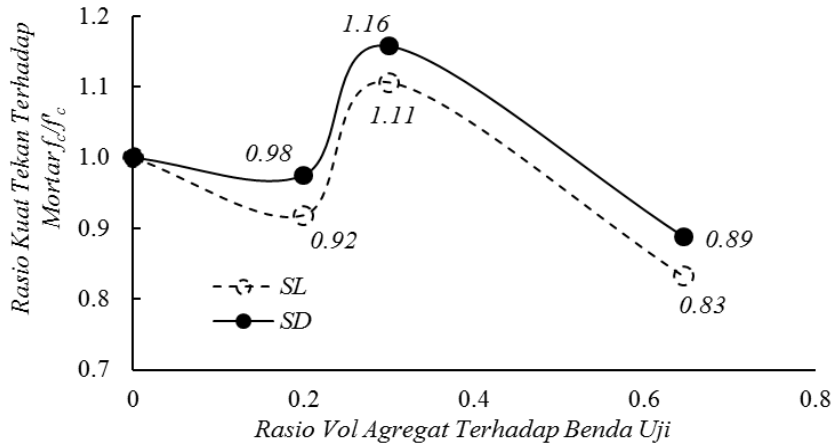
Saat pembuatan benda uji, pengecoran dilakukan sebanyak 2 kali. Setiap pengecoran diambil 6 buah sampel silinder mortar ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm untuk mengetahui kuat tekan mortar. Rata-rata nilai kuat tekan mortar dari 12 silinder yang dibuat adalah 32,34 MPa dengan nilai modulus elastisitas awal ( $E_0$ ) 23,7 GPa. Pengujian kuat tekan agregat dilakukan sebanyak dua kali dengan rata-rata bernilai 148,76 MPa dan modulus elastisitas ( $E$ ) 125 GPa. Hasil respon beban-perpindahan ( $P-\Delta$ ) dari masing-masing benda uji kemudian dibandingkan perilakunya terhadap material dasar mortar dan agregat dengan rasio perbandingan terhadap *mortar-only* (SO). Hasil disajikan pada gambar 1 berikut ini.



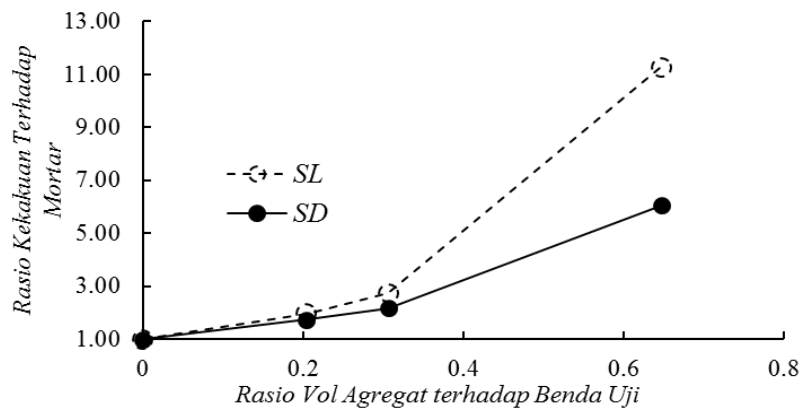
Gambar 1. Perbandingan respon beban-perpindahan benda uji terhadap material dasar

Rata-rata dari enam data untuk setiap kategori dihitung untuk mewakili besar nilai kuat tekan masing-masing benda uji. Kapasitas maksimum dan nilai kekakuan masing-masing benda uji kemudian dirasioikan terhadap pembanding tanpa inklusi, mortar-only (SO) untuk mengabaikan koreksi kesalahan yang terjadi selama proses pembuatan dan proses pengujian. Data hasil rasio ini kemudian diplot terhadap rasio volume inklusi terhadap volume benda uji. Semakin besar rasio volume inklusi terhadap volume benda uji, maka

semakin banyak persentase inklusi yang terdapat pada suatu benda uji. Rasio 0 digunakan untuk mortar-only (SO) dimana tidak terdapat inklusi di dalamnya. Hasil analisa terhadap kapasitas kekuatan dan kekakuan benda uji tersebut ditampilkan pada gambar 2 dan gambar 3 berikut ini.



Gambar 2. Hubungan kapasitas kekuatan terhadap volume inklusi



Gambar 3. Hubungan nilai kekakuan terhadap volume inklusi

Gambar 2 menunjukkan suatu *trend* yang konsisten untuk kedua konfigurasi inklusi arah sejajar dan diagonal. Penambahan jumlah agregat dengan rasio volume inklusi 0,2 mula-mula mengalami penurunan nilai kuat tekan. hal ini sesuai dengan penemuan dari penelitian Han et al. (2013) dimana apabila suatu matriks mortar ditambahkan material inklusi maka terjadi pula penambahan ITZ pada matriks tersebut sehingga perlemahan kuat tekan yang terlebih dahulu akan terjadi. Namun demikian, ketika penambahan volume inklusi digandakan 50%, peningkatan nilai kuat tekan pun terdeteksi. Pada titik ini, kapasitas maksimum untuk inklusi dengan arah sejajar dan diagonal memiliki nilai yang lebih besar daripada benda uji *mortar-only* (SO). Untuk setiap besar rasio volume inklusi yang digunakan, benda uji dengan inklusi arah diagonal menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi berkisar 4,6% - 6,7% dibandingkan dengan benda uji dengan inklusi arah sejajar. Untuk benda uji dengan tingkat kepadatan inklusi yang tinggi (SL<sub>3</sub> dan SD<sub>3</sub>) justru mengalami penurunan kapasitas kekuatan yang cukup drastis.

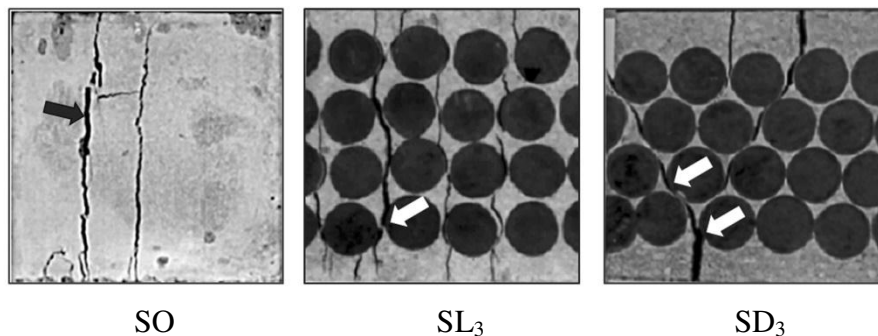
Pada gambar 3, terjadi peningkatan nilai kekakuan pada kedua kategori inklusi arah sejajar maupun diagonal untuk semua nilai rasio volume inklusi. Pada tingkat rasio volume inklusi

yang rendah, peningkatan nilai kekakuan cenderung kecil untuk kategori SL dan SD. Seiring dengan penambahan nilai rasio volume inklusi yang semakin tinggi, peningkatan nilai kekakuan semakin signifikan terjadi. Peningkatan yang lebih signifikan terjadi pada benda uji dengan inklusi arah sejajar dengan rasio volume inklusi tertinggi (SL<sub>3</sub>) yaitu sebesar 11 kali dari benda uji *mortar-only* (SO), sedangkan pada benda uji dengan inklusi arah diagonal hanya mengalami peningkatan maksimum sebesar 6 kalinya.

### Data Kualitatif

Pengamatan visual terhadap benda uji selama proses pengujian dengan cara direkam dilakukan untuk menganalisa *first-crack* dan pola persebarannya hingga benda uji mengalami keruntuhannya. Gambar 4 menunjukkan tempat dimana *first-crack* terjadi untuk benda uji SO, SL<sub>3</sub>, dan SD<sub>3</sub>. Untuk benda uji SO dimana tidak terdapat inklusi di dalamnya, pola retak yang terjadi membentuk garis lurus vertikal (*columnar*) di sepanjang penampang benda uji. Pola keruntuhan ini sesuai dengan prinsip dasar dari rengangan pada beton dimana terdapat nilai Poisson Ratio. Pengujian menggunakan Teflon pada bagian atas dan bawah sehingga tidak terdapat gesekan pada sisi atas dan bawah benda uji. Tanpa adanya kekangan pada benda uji, tegangan tarik akan maksimal terjadi menuju arah horizontal hingga benda uji SO akhirnya runtuh.

Ketika inklusi ditambahkan pada matriks mortar maka ITZ yang menjadi titik lemah dari beton menjadi hal penting yang harus dipertimbangkan. Dari gambar 4 menunjukkan bahwa untuk kedua benda uji SL<sub>3</sub> dan SD<sub>3</sub>, *first-crack* muncul pada *interface area* bertegangan tarik. Retak tersebut kemudian menyebar disepanjang matriks mortar, menghubungkan titik-titik keruntuhan dari ITZ. Saat beban semakin meningkat, retak yang terjadi kemudian semakin besar hingga akhirnya benda uji mengalami keruntuhan.



Gambar 4. *First-crack* dan pola keruntuhan benda uji

Dari hasil pengamatan dapat dilihat bahwa mortar-only (SO) mengalami pola keruntuhan berbentuk vertikal, sejajar dengan arah pembebanan. Sedangkan pada benda uji SL<sub>3</sub> dan SD<sub>3</sub> yang terdapat inklusi, keruntuhan awal berupa *first-crack* terdeteksi pada daerah ITZ bertegangan tarik yang kemudian semakin besar dengan semakin bertambahnya pembebanan. Pada benda uji SL<sub>3</sub> dimana inklusi disusun pada satu garis lurus, menciptakan pola retak yang relatif lurus mengikuti susunan dari inklusi yang lurus tersebut. Hal yang berbeda terjadi pada benda uji SD<sub>3</sub> dimana inklusi disusun secara diagonal, pola retak mengalami deviasi/pembelokan dari garis vertikal.

## ANALISA HASIL

Perlemahan kapasitas kekuatan yang terjadi pada benda uji dengan rasio volume inklusi 0,20 disebabkan oleh keberadaan dari ITZ. Ketika penambahan inklusi pada suatu matriks mortar dilakukan, benda uji bukan hanya terdapat dua elemen saja namun terdapat pula elemen ketiga yaitu ITZ akibat dari kontak antara material mortar dan agregat. Walaupun agregat memiliki kapasitas kekuatan dan kekakuan yang sangat tinggi, efek negatif dari ITZ lebih dominan terjadi sehingga kapasitas kekuatan benda uji justru mengalami penurunan. Nilai kekakuan justru terus mengalami peningkatan, sehingga diduga keberadaan dari ITZ tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perilaku kekakuan benda uji. Analisa ini dikuatkan dengan hasil observasi secara visual terhadap *first-crack* yang terjadi. Pada kedua benda uji SL dan SD, *first-crack* muncul pada bagian ITZ bertegangan tarik, tegak lurus dengan arah pembebanan.

Saat rasio volume inklusi meningkat, kapasitas kekuatan dan kekakuan pun menunjukkan peningkatan. Pada titik ini, efek negatif dari ITZ telah diredam oleh dominasi dari kekuatan inklusi. Lokasi dari *first-crack* tetap tidak berubah dan selalu muncul pada bagian ITZ bertegangan tarik. Pola keruntuhan benda uji masih membentuk garis vertikal lurus (*columnar*), sebab konfigurasi dari inklusi yang masih memungkinkan untuk membentuk garis lurus sejajar arah pembebanan. Pada rasio volume inklusi sebesar 0,30 inilah dicapai kapasitas kekuatan yang paling maksimum dimana inklusi lebih mendominasi dibandingkan dengan perlemahan dari ITZ sehingga dapat mencapai nilai kapasitas kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji *mortar-only* (SO).

Untuk benda uji dengan rasio volume inklusi 0,65, dapat terlihat penurunan nilai kapasitas kekuatan terjadi. Hal ini terjadi disebabkan karena volume inklusi yang lebih besar dibandingkan dengan volume mortar menciptakan lekatan yang sangat buruk antar inklusi dan matriks mortar. Konfigurasi dari inklusi yang sangat rapat juga memberikan dampak pada proses pemadatan benda uji yang menjadi lebih sulit, hasil benda uji cenderung buruk dan mudah keropos. Pada rasio ini pula terjadi peningkatan yang sangat signifikan pada nilai kekakuan benda uji yang cenderung mendekati nilai kekakuan dari inklusi itu sendiri. Pola retak mengalami pembelokan untuk benda uji dengan inklusi arah diagonal, menyebabkan benda uji dengan inklusi arah diagonal cenderung memiliki kapasitas kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan inklusi berkonfigurasi sejajar.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh jarak, konfigurasi, dan jumlah dari inklusi sangat mempengaruhi nilai kapasitas kekuatan dan nilai kekakuan dari beton. Beton merupakan material yang memiliki tiga elemen utama yang masing-masing elemen tersebut harus sangat diperhatikan. Perpaduan dari efek perlemahan ITZ dan pengaruh dominasi agregat membuat beton memiliki nilai maksimum dan minimum untuk variasi volume inklusi yang digunakan. Hal inilah yang menjadi krusial dalam menentukan proporsi jumlah agregat pada suatu konstruksi agar memiliki nilai kuat tekan yang optimum, sebab penggunaan jumlah inklusi yang berlebihan justru memberikan dampak negatif pada nilai kapasitas kekuatan dan proses pemadatan menjadi sangat sulit. Nilai kekakuan beton sangat bergantung pada jumlah agregat pada suatu campuran beton

tersebut. Respon beban-perpindahan juga menunjukkan bahwa perilaku benda uji dengan jumlah inklusi yang tinggi menyebabkan benda uji menjadi bersifat lebih getas.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Abipramono, R., 1997. *Penambahan Multi Inklusi Baja Terhadap Kekuatan Beton dalam Tinjauan Dua Dimensi*, Master's Thesis, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- ASTM C 33/03, 2003. *Standard specifications for Concrete Aggregates*, Annual Books of ASTM Standards, USA.
- ASTM C39, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”, Annual Books of ASTM Standards, USA.
- ASTM 109/C 109M-02, *Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, Annual Books of ASTM Standards, USA.
- Han, A. L., Sabdono, P., Indarto, H., and Setiawan, Y., 2013. *The Effect of ITZ Area Between the Aggregate and Mortar to the Load-Displacement Behavior in Conventional Concrete and Its Influence on Structures*, The 4th International Conference of EACEF (European Asian Civil Engineering Forum) in National University of Singapore, Singapore.
- Han, A.L., Gan, B.S., Setiawan, Y., 2014. *The Influence of Single Inclusions to the Crack Initiation, Propagation and Compression Strength of Mortar*, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) in Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.